



HAL
open science

Prise en compte de l'état réel d'un système complexe pour l'aide à la décision de séquences de conduite

Mohammed Farouk Bouaziz, Pascale Marangé, Alexandre Voisin,
Jean-François Pétin

► To cite this version:

Mohammed Farouk Bouaziz, Pascale Marangé, Alexandre Voisin, Jean-François Pétin. Prise en compte de l'état réel d'un système complexe pour l'aide à la décision de séquences de conduite. 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14, Nov 2014, Nancy, France. hal-01087888

HAL Id: hal-01087888

<https://hal.science/hal-01087888>

Submitted on 27 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PRISE EN COMPTE DE L'ETAT REEL D'UN SYSTEME COMPLEXE POUR L'AIDE A LA DECISION DE SEQUENCES DE CONDUITE

M.-F. BOUAZIZ, P. MARANGE, A. VOISIN, J.-F. PETIN

Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039,
Campus Sciences, BP 70239
54506 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France
CNRS, CRAN, UMR 7039, France
{mohammed-farouk.bouaziz ; pascal.marange ;
alexander.voisin ; jean-francois.petin}@univ-lorraine.fr

RESUME : *Cet article présente une méthode de classement des séquences de conduite des systèmes complexes intégrant l'état réel de celui-ci. Cet objectif est atteint par l'utilisation conjointe de la notion de bilan de santé et de la théorie de l'utilité multi-attributs. Notre contribution réside dans la proposition d'un processus de classement de séquences à partir des données et des connaissances métiers. Le résultat de classement est un élément d'aide à la décision qui permet de mettre à la disposition des experts un classement objectif et consensuel. Une première étude de cas est présentée sur la base d'une plate-forme expérimentale, et nous a permis de comparer les résultats de deux opérateurs d'agrégation de compromis : la moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet.*

MOTS-CLES : *Aide à la décision, Séquences de conduite, Bilan de santé, Classement, Utilité multi-attribut, Systèmes de conduite.*

1 INTRODUCTION

Dans le domaine industriel, la conduite des systèmes est devenue de plus en plus complexe. L'augmentation de cette complexité provient de plusieurs facteurs (Zio, 2009) :

- l'augmentation de la complexité des systèmes pilotés (augmentation de la taille, du nombre et de l'hétérogénéité des équipements, complexification du contrôle-commande, des missions à accomplir, cohabitation entre des équipements automatisés et manuels, etc.),
- la difficulté d'avoir une vision globale et complète du système, i.e. représentation mentale par l'expert,
- l'augmentation des contraintes d'une part réglementaires, sécuritaires et environnementales imposées et d'autre part sociétales induites,
- difficulté pour l'expert de faire la synthèse des trois points précédents.

La conduite est basée en grande partie sur la connaissance humaine qui doit tenir compte de l'ensemble des interactions du système complexe avec son environnement. La conduite a pour objectif de permettre au système complexe d'accomplir les missions pour lesquelles il a été conçu. Pour cela, elle sollicite les fonctions du système. Le système est décomposé en sous-systèmes puis équipements assurant ces fonctions.

Pour un système complexe, il est généralement préconisé de préparer et définir en amont les séquences, i.e. l'ensemble d'actions à exécuter pour que le système

accomplisse une mission. La définition des actions à réaliser se heurte au fait que de nombreux matériels sont requis en permanence, que ce soit pour des raisons de sûreté, de production ou d'environnement. De manière à faciliter la tâche de conduite, il est nécessaire d'identifier a priori les séquences de conduite admissibles d'un point de vue de la sécurité et/ou de la disponibilité des matériels. Cette préparation est assurée par des méthodes de génération de séquences.

Cependant, la vue informationnelle de l'état du système et de ses équipements intégrée dans les modèles de génération de séquences est binaire. Ainsi, l'état réel du système (par nature graduel dans les systèmes complexes), au moment du choix de la séquence à réaliser, ne peut pas être pris en compte.

Aussi, parmi les séquences admissibles permettant de remplir la mission définie, l'expert doit choisir une séquence particulière au moment de la réalisation de la mission. Ce choix se base sur des connaissances métiers, l'état réel du système au moment de cette décision, etc.

L'objectif de ce papier est de proposer une aide à la décision de la séquence de conduite à réaliser parmi les séquences proposées et son originalité réside donc dans la proposition d'une approche qui permet d'intégrer à terme :

- les caractéristiques des équipements dans l'aide à la prise de décision (hétérogénéité, nombre, importance...),
- le contexte opérationnel dans la définition des critères de décision (temps, coûts, performance, nature de sollicitation...),

- l'état réel des équipements de l'installation (suivi des évolutions graduelles),
- le comportement de l'expert.

Cet article est organisé comme suit : les sections 2 et 3 sont consacrées respectivement à la présentation du contexte de l'étude et à la formalisation du problème. La section 4 introduit le processus de classement adopté. La section 5 présente une application de l'approche proposée sur un cas d'étude. Une conclusion et des perspectives termineront cet article.

2 CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS

Cette partie présente dans un premier temps, de manière synthétique les approches classiquement utilisées pour déterminer une séquence d'actions qui assure le respect d'exigences données. Dans un deuxième temps, nous présenterons l'approche de classement permettant d'intégrer des informations supplémentaires pour le choix de séquence.

2.1 Génération de séquence : état de l'art

Deux grandes familles d'approche existent pour obtenir des séquences sûres : soit la vérification/validation, soit la synthèse de la commande.

Les premières approches utilisent la vérification et validation (Frey et Litz, 2000) et permettent de vérifier si une séquence respecte ou non des propriétés. Les méthodes sont :

- le model-checking qui vérifie automatiquement les propriétés et détermine si elles sont vraies et dans le cas contraire, fournit un contre-exemple (Schnoebelen *et al.*, 1999), (Frey et Litz, 2000) et (Machado *et al.*, 2006),
- la recherche d'atteignabilité qui vérifie l'atteignabilité ou non d'états définis comme interdits (Kowalewski et Preuig, 1996) ou des états objectifs,
- le théorème Proving qui à partir des spécifications formelles, prouve mathématiquement les propriétés (Volker et Kramer, 2002), (Roussel et Faure, 2002) et (Rushby, 2000).

Une seconde famille d'approches pour obtenir l'ensemble des séquences d'action est la synthèse s'appuyant sur les travaux de (Wonham et Ramadge, 1987) et (Ramadge et Wonham, 1989). L'objectif est de définir l'ensemble des trajectoires qui correspondent aux spécifications souhaitées par la commande. L'objectif des travaux précédemment cités, est de proposer des solutions au problème d'explosion combinatoire en réduisant la taille des modèles (Niel *et al.*, 2001).

La limite de ces approches est l'explosion combinatoire. Comme nous souhaitons tenir compte de l'état réel du système, nous avons besoin d'enrichir les modèles augmentant donc le risque d'explosion combinatoire. Ainsi, l'approche proposée se concentre sur l'évaluation des

séquences données a priori, par les méthodes présentées, en intégrant l'état réel du système. Dans la suite du papier, ces séquences données a priori seront considérées comme sûres d'un point de vue de la sûreté, i.e. générée par une méthode classiquement utilisée. Nous présentons une approche pour classer cet ensemble de séquences.

2.2 Classement : objectif de l'étude

Lors de la définition d'une mission, l'expert doit choisir une séquence particulière d'actions de conduite à exécuter à partir de plusieurs séquences admissibles. Ce choix est basé sur des :

- connaissances explicites : qui sont généralement prise en compte dans la génération de séquences admissibles,
- connaissances implicites : les critères de décision définis par l'expert par exemple,
- connaissances synthétiques : la représentation du système complexe par l'expert. En effet, le niveau de représentation des informations de l'expert n'est pas le même que celui des actions de la séquence,
- connaissances erronées : par exemple, la représentation de l'installation par l'expert peut être fautive lorsque des phénomènes de compensation de dégradation existent,
- connaissances subjectives : par exemple, deux experts peuvent ne pas choisir la même séquence.

Ainsi, l'approche proposée dans ce papier cherche à mettre à la disposition des experts des éléments d'aide au choix en s'appuyant sur l'état réel du système. L'objectif est, d'une part, de proposer à l'expert un classement de séquences basé sur un ensemble d'informations objectives et consensuelles, et d'autre part, de rendre explicite le choix d'une séquence en définissant les critères et les « règles » de décision et en prenant en compte l'état réel au même niveau que les actions de la séquence.

3 FORMALISATION DU PROBLEME

L'aide à la sélection de séquences consiste à proposer à l'expert un classement des séquences de conduite envisagées. Ce classement doit tenir compte en partie de la complexité de la conduite réelle. Ainsi, l'obtention de ce classement se base sur une représentation de la réalité à travers des propriétés liées aux séquences de conduite et à l'état actuel du système. Nous utilisons le cadre de la décision multicritères et plus précisément celui de la théorie de l'utilité multi-attributs. Dans la suite, nous présentons la notion de bilan de santé d'un système qui nous permet d'assurer le suivi de l'état courant du système. Puis, nous introduisons la théorie de l'utilité multi-attributs.

3.1 Notion de bilan de santé

Le suivi de l'état courant d'un système est assuré par le processus de surveillance (Health Monitoring) (Kalgren *et al.*, 2006). L'objectif de ce processus est d'obtenir une

image de l'état du système et ainsi fournir une évaluation de sa condition/santé (Racoceanu, 2006). Les informations issues des capteurs sont récupérées pour être transformées en indicateurs, par exemple de défaillance à partir d'une référence illustrant le fonctionnement normal ou anormal (dégradé ou inconnu) du système (Ribot, 2009) et (Bouaziz *et al.*, 2013).

La notion de santé d'un équipement a été abordée dans la littérature. (Byington *et al.*, 2004) indique que l'évaluation de la santé correspond à la représentation du niveau réel des déviations relativement à un état normal. (Liu, 2007) désigne par la santé d'un système/équipement sa capacité à effectuer la fonction définie et attendue et peut donc être considéré comme le degré d'une performance requise. (Shin, 2009) souligne que la performance d'un produit/composant est évaluée tout au long de sa période d'utilisation par rapport aux spécifications de conception en caractérisant la dégradation de cette performance dans le temps par sa criticité, sa gravité et son anormalité. (Kumar et Pecht, 2010) renvoie également au fait que le contexte devrait être intégré dans les paramètres de suivi de la santé. Ainsi, la notion de santé est une grandeur complexe qui reflète des aspects liés aux performances, aux dysfonctionnements et à l'environnement.

(Abichou, 2013) a proposé une représentation générique de ces aspects à partir de la représentation systémique (Figure 1) sous la forme d'un bilan de santé. Un bilan de santé est un ensemble d'indicateurs de trois types :

- **Fonctionnels** : permettent de surveiller la fonction accomplie par l'élément adressé à tous les niveaux de la structure hiérarchique du système. Ces indicateurs sont principalement axés sur la représentation, d'une part, des flux (d'énergie ou d'information) de la fonction, et d'autre part, de ses performances. Nous trouvons dans cette deuxième catégorie en particulier, les indicateurs représentant l'efficacité (rapport des résultats aux objectifs), et ceux reflétant l'efficience (rapport entre les résultats et les ressources engagées).
- **Dysfonctionnels** : sont essentiellement liés à l'évolution des mécanismes de dégradation. Ce type d'indicateurs peut représenter :
 - le mécanisme de dégradation lui-même (usure, fissure, fuite...). Les indicateurs sont construits à

partir des paramètres physiques caractéristiques du composant supportant la fonction suivie,

- les symptômes observables révélateurs de l'apparition de ces mécanismes (hausse de température, vibrations, caractéristiques acoustiques...),
- les facteurs externes de dégradation (comme les chocs subits par le système, contraintes mécaniques d'usage...).
- **Environnementaux** : permettent de contextualiser les valeurs prises par les indicateurs fonctionnels et dysfonctionnels par rapport aux conditions dans lesquelles le système évolue. Ainsi, les variations de ces indicateurs, résultant d'un changement des conditions opérationnelles ou environnementales, peuvent être détectées et, seules les dérives des indicateurs fonctionnels et dysfonctionnels causées par des anomalies sont effectivement prises en compte.

La formalisation d'un bilan de santé d'un élément E est donnée par (Abichou, 2013) :

$$\mathcal{V}(E) \triangleq \{I_1^P, \dots, I_{npE}^P\} \cup \{I_1^D, \dots, I_{ndE}^D\} \cup \{I_1^{En}, \dots, I_{nenE}^{En}\} \quad (1)$$

où : $\mathcal{V}(E)$ est l'ensemble des indicateurs pour un élément E du système, I_j^x est le $j^{ème}$ indicateur de performance ($x=P$) de dégradation ($x=D$) ou environnemental ($x=En$) et nx_E indique le nombre d'indicateurs affectés à un E .

3.2 Théorie de l'utilité multi attributs

Le problème de classement des séquences est un problème de décision multicritère. Dans ce cadre, pour (Grabisch et Perny, 2007), il s'agit d'évaluer les « performances » de chaque alternative, i.e. de chaque séquences, selon les points de vues pertinents du problème et de les ranger suivant leurs performances. Le problème devient alors un problème de comparaison puisque les alternatives doivent être comparées 2 à 2 afin d'obtenir un classement complet. Cette comparaison se fait sur la base de la représentation des alternatives par des valeurs de critères représentant les points de vues pertinents du problème. La difficulté réside dans les différences entre les critères des deux alternatives qui peuvent être de sens opposés. Un exemple classique est le choix d'une voiture suivant sa consommation et sa vitesse.

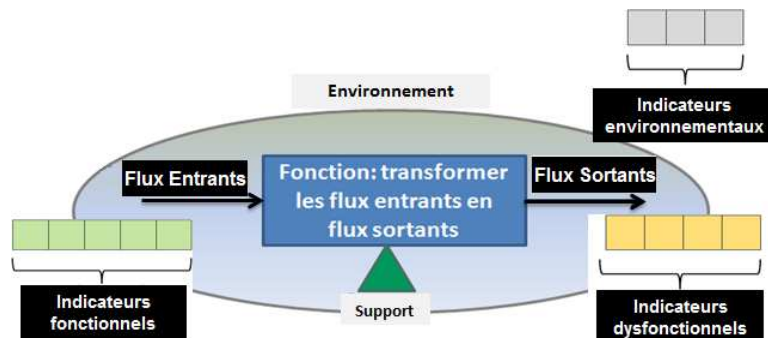


Figure 1 : Bilan de santé associé à la représentation systémique d'un système

Le problème se formalise alors de la manière suivante, nous cherchons à construire une fonction f , telle que :

$$a \succcurlyeq b = f(a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n) \quad (2)$$

où : $a \succcurlyeq b$ est un prédicat binaire tel que $a \succcurlyeq b = 1$ si a est préféré ou indifférent à b . Et a_1, \dots, a_n et b_1, \dots, b_n représentent les valeurs des critères de décision pour chacune des alternatives a et b . \succcurlyeq est généralement donné par un expert sous forme de choix entre 2 alternatives.

La fonction f nécessite d'utiliser d'une part une agrégation (ψ) et d'autre part une comparaison (ϕ). La construction de f peut se faire soit par une approche « agréger puis comparer » ou bien par une approche « comparer puis agréger » (Grabisch et Perny, 2007). Bien que montrant un intérêt, par exemple lorsque nous combinons des critères quantitatifs et qualitatifs, l'approche « comparer puis agréger » montre un certain nombre de limites (Arrow, 1951), (Perny, 1992) et (Sen, 1986). Nous nous situons donc dans une approche « agréger puis comparer ». La formalisation de cette approche consiste à trouver une représentation numérique de la préférence, i.e. une fonction $\gamma : X \rightarrow \mathbb{R}$, telle que :

$$\forall a \text{ et } b, \quad a \succcurlyeq b \Leftrightarrow \gamma(a) \geq \gamma(b) \quad (3)$$

Si \succcurlyeq est une relation binaire complète et transitive, γ peut alors prendre la forme :

$$\gamma(a) = \psi(u_1(a_1), \dots, u_k(a_n)) \quad (4)$$

Les u_k sont des fonctions de $X_i \rightarrow [0,1]$ appelées fonctions d'utilités marginales car se rapportant à chaque critères. Notons que l'échelle $[0,1]$ est utilisée pour les fonctions d'utilités bien que dans le cas général elles soient définies sur \mathbb{R} .

Une conséquence de cette formulation est que toutes les actions sont comparables ; cette propriété n'est pas toujours souhaitable ou possible car nous observons que pour un expert, il existe des situations comportant des actions incomparables. Nous supposons que pour tout couple de séquences a et b , l'expert est capable de comparer deux séquences, et de donner sa préférence ($a \succcurlyeq b$ ou $b \succcurlyeq a$). Ainsi, l'ensemble des u_k et ψ reflètent les préférences de l'expert. Les u_k traduisent sur chaque critère indépendamment les préférences quant aux valeurs prises par le critère. Elles permettent à l'expert

d'exprimer les valeurs acceptables ou non acceptables. Les fonctions d'utilités u_k permettent d'assurer :

- Une sémantique commune aux critères de décisions : les critères étant hétérogènes, il convient pour les agréger d'assurer une même sémantique. Cette sémantique correspond à un score ou degré de satisfaction.
- Une échelle commune et l'hypothèse de commensurabilité : cette propriété assure qu'un même niveau d'utilité sur deux critères différents correspond à une intensité de satisfaction identique.

La fonction d'agrégation ψ permet d'agréger les utilités. Pour que (4) soit vérifiée, il est nécessaire que ψ soit idempotente :

$$\psi(\alpha, \alpha, \dots, \alpha) = \alpha \quad (5)$$

avec $\alpha \rightarrow [0,1]$.

ψ doit permettre de refléter les préférences de l'expert dans sa prise en compte des différents critères. Ainsi, il est souhaitable que ψ puisse exprimer (Grabisch et Perny, 2007) :

- des importances relatives entre critères,
- des attitudes plus ou moins tolérantes ou intolérantes vis-à-vis de certains critères,
- des interactions entre critères.

Ainsi, d'après l'équation (4), le classement de séquences revient à trouver les fonctions u_k et ψ .

3.3 Du bilan de santé à la décision multicritère

Dans ce papier, nous proposons d'utiliser la notion de bilan de santé des équipements associés aux séquences de conduite afin de classer ces séquences (seq_i) en se basant sur la théorie de l'utilité multi-attributs. Comme indiqué dans la section précédente, la prise de décision finale doit passer par différentes phases. Nous présentons dans la figure 2, les principaux objets permettant d'arriver à la décision.

La décision est basée sur des objets de décision décrits par un ensemble de critères commensurables et sémantiquement consistants représenté par des fonctions d'utilités (voir équation 4) :

$$score(seq_i) = \psi(u_1(seq_i), \dots, u_k(seq_i)) \quad (6)$$

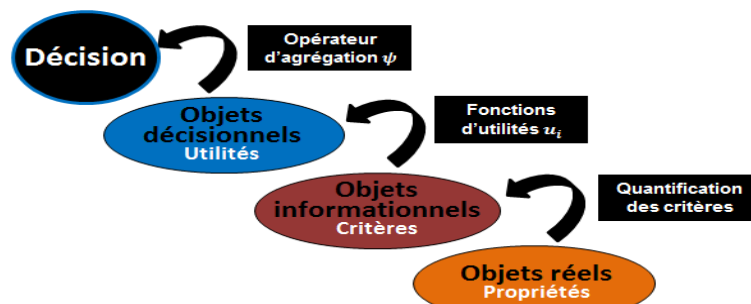


Figure 2 : Coopération bilan de santé et théorie multicritère

Pour obtenir les utilités u_k , il est nécessaire d'avoir une représentation informationnelle des objets sur lesquels la décision porte. Ainsi, ces objets informationnels quantifient les critères de décision cd_k sur des échelles qui leur sont propres :

$$u_k(séq_i) = u_k(cd_k(séq_i)) \quad (7)$$

Les critères sont construits à partir des propriétés d'objets réels tels que les propriétés des séquences $\mathcal{P}(séq_i)$ ou des équipements eq_j pour lesquels nous utilisons leurs bilans de santé $\mathcal{V}(eq_j)$:

$$cd_k(séq_i) = f(\mathcal{V}(eq_j), \mathcal{P}(séq_i)) \quad (8)$$

avec : $\forall eq_j \in \mathcal{E}(séq_i)$ et $\mathcal{E}(séq_i)$ est le nombre d'équipements dans la séquence $séq_i$.

Si pour les utilités et la décision nous retrouvons un cadre classique d'aide à la décision, pour la première étape de quantification, se pose le problème de l'hétérogénéité des séquences et des équipements adressés.

4 DESCRIPTION DU PROCESSUS DE CLASSEMENT

Le processus de classement des séquences d'actions de conduite que nous proposons se décompose en quatre étapes (Figure 3) :

- Quantifier : un modèle de quantification permet d'établir le lien entre les propriétés des séquences et des bilans de santé et les critères de décision.
- Calculer : un modèle de calcul des utilités u_k à partir des critères de décision préétablies.
- Agréger : un opérateur d'agrégation ψ pour attribuer un score à chaque séquence.
- Classer : un opérateur de classement ϕ des séquences.

Avant de détailler chacune des quatre étapes du processus de classement, certaines hypothèses sur les éléments de travail sont nécessaires :

- Toutes les séquences réalisent la même mission.
- Les séquences d'actions sont supposées admissibles d'un point de vue sûreté.
- Tous les équipements de la séquence contribuent à la réussite de la mission.
- Les propriétés et les bilans de santé sont disponibles.

4.1 Quantification des critères de décision

Dans le cas général, le modèle de quantification permet d'établir le lien entre critères de décision, séquences d'actions et l'état des équipements. Au préalable, une liste de critères est établie à partir des connaissances métiers, ceci afin d'identifier les principaux éléments pris en compte par l'expert dans son choix de séquence (par exemple des indications sur les temps, sur les coûts ou sur les performances). Pour chaque critère de décision étudié, une fonction mathématique est établie, afin de combiner des propriétés de la séquence et/ou des propriétés des éléments de bilan de santé des équipements de cette même séquence. Pour la suite des étapes du processus de classement, ce modèle de quantification doit être instanciable pour les I séquences d'actions et les J bilans de santé en entrée. En sortie de ce modèle, nous obtenons les valeurs des N critères de décision.

4.2 Calcul des utilités

Une fonction d'utilité u_k représente la relation entre des valeurs numériques des critères (valeurs des coûts par exemple) et un référentiel d'utilité allant de zéro (pour les valeurs rejetées) à un (pour les valeurs préférées).

Ces fonctions peuvent être obtenues soit par apprentissage à partir d'un historique de données soit à partir de connaissance métier (Grabisch, 2006). Notre contexte de travail est caractérisé par une expertise métier fortement mise en avant et par conséquent la deuxième approche est adoptée pour définir la forme des N utilités.

4.3 Agrégation

Un mécanisme d'agrégation fusionne différentes informations en une valeur globale. Dans le cas général, le score agrégé contribue à la prise de décision à partir de situations souvent contradictoires. Pour le classement de séquences, l'opérateur d'agrégation ψ permet d'attribuer un score à chaque séquence (I scores pour les I séquences) à partir des critères normalisés (N utilités).

Il existe quatre grandes classes d'opérateurs d'agrégation (Beliakov *et al.*, 2007) : conjonctive, disjonctive, de compromis et hybrides. Cependant, seuls les opérateurs de compromis respectent la propriété d'idempotence (voir équation 5). Les principaux opérateurs de compromis sont : la moyenne arithmétique, la

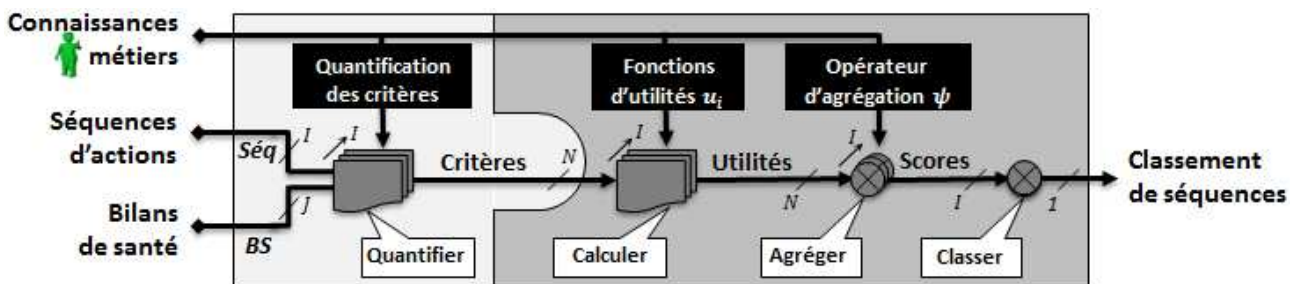


Figure 3 : Processus de classement

moyenne pondérée, la moyenne pondérée ordonnée et les intégrales floues. Cette dernière famille d'opérateurs d'agrégation permet de prendre en compte l'interaction entre les critères (Grabisch et Perny, 2007).

4.4 Classement

La quatrième et la dernière étape du processus de classement consiste à ordonner les I scores du meilleur au moins bon. L'agrégation ayant permis d'obtenir un score sur \mathbb{R} , l'opérateur d'ordre \geq est utilisé pour classer les I séquences de la mission objectif (voir équation 3). Ce classement doit refléter au mieux le classement représenté par la relation de préférence \succsim . Le résultat du classement est un élément d'aide à la décision qui est utilisé pour la définition de la séquence de conduite.

5 APPLICATION DE L'APPROCHE PROPOSEE

L'approche proposée est vérifiée sur la plate-forme expérimentale CISPI « Conduite Interactive et Sûre de Procédés Industriels » du laboratoire CRAN, qui a pour objectif de développer des démonstrateurs afin de tester des nouvelles solutions pour une meilleure conduite des procédés industriels complexes tout en assurant leur sécurité (Clanché *et al.*, 2010).

5.1 Description du cas d'étude

Cette partie s'attache à décrire en détails les spécifications du cas d'étude. Le processus de classement proposé est illustré sur un sous-système de l'installation CISPI (Figure 4), qui transfère du liquide de la cuve principale vers la cuve de stockage.

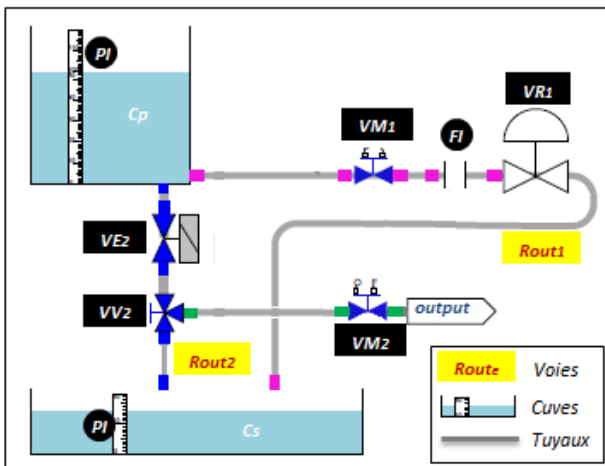


Figure 4 : Voies d'acheminement du liquide

La mission considérée dans cet exemple vise à remplir la cuve de stockage à partir de deux voies représentées par un lignage latéral (voie 1) et un lignage vertical (voie 2). Les éléments concernés par ces deux voies de circulation du fluide sont :

- vannes manuelles instrumentées : VM_1, VM_2
- vanne manuelle à trois positions : VV_2
- vanne de régulation : VR_1
- électrovanne : VE_2

- capteurs de débit : FI_1, FI_2
- capteurs de pression : PI_1, PI_2
- capteurs de position sans fil : $P-VM_1, P-VM_2$
- cuves : principale C_p et de stockage C_s
- tuyaux : $T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{21}, T_{22}, T_{23}, T_{24}, T_{25}$
- fluide : eau

Aussi, nous définissons les propriétés fonctionnelles et techniques des équipements (indépendamment de la notion bilan de santé). À titre d'exemple, les vannes manuelles sont caractérisées par :

- leur fonction principale : régulation de débit
- leurs actions : fermeture ou ouverture
- leurs types : linéaire ou tout ou rien
- leurs valeurs nominales : débit, diamètre, etc.
- leurs temps : de parcours entre équipements, etc.

Lors de la réalisation de la séquence, l'opérateur se déplace d'un équipement manuel à un autre avec des temps de parcours définis dans le tableau 1 et exprimés en unité de temps UdT .

	VV_2	VM_1	VM_2
VV_2		15	15
VM_1	15		30
VM_2	15	30	

Tableau 1 : Temps de parcours

5.1.1 Définition des séquences d'action

A partir de l'ensemble des équipements mentionnés, trois séquences admissibles sont définies pour assurer la réalisation de la mission :

- seq_1 : $\perp VM_1 \perp VR_1$ (voie 1)
- seq_2 : $\perp VM_2 \perp VV_2 \perp VE_2$ (voie 2)
- seq_3 : $\perp VM_1 \perp VR_1 \perp VM_2 \perp VV_2 \perp VE_2$ (voies 1 et 2)

où \perp/\top : représente l'ouverture/fermeture d'une vanne.

Chacune de ces séquences est caractérisée par un ensemble de propriétés liées aux actions (manuelles et automatiques) et aux caractéristiques des équipements (i. équipements liés à une action ou actionnés, comme les vannes et les pompes. ii. équipements de structure ou passifs, comme les cuves et les tuyaux).

5.1.2 Définition des bilans de santé

Le modèle de classement proposé prend en compte l'état réel des équipements, à travers la notion de leur bilan de santé $\mathcal{V}(eq_i)$. Comme défini précédemment, le bilan de santé d'un équipement donné intègre des éléments fonctionnels, dysfonctionnels et environnementaux. Les éléments de $\mathcal{V}(eq_i)$ pour les équipements VM_b, T_x et C_x sont résumés dans le tableau 2.

Chacun de ces éléments est alimenté par les mesures disponibles et/ou la connaissance métiers, par exemple :

- coûts des actions manuelles CAM (VM_1) : $7UdC$
- coûts de matériels CdM (VM_1) : $5UdC$
- coûts des actions automatisées CAA (VR_1) : $1UdC$
- coûts de matériels CdM (VR_1) : $3UdC$
- temps d'ouverture (VM_1) et (VM_2) : $T_o = 5UdT$
- temps de fermeture (VM_1) et (VM_2) : $T_f = 5UdT$
- temps d'ouverture/fermeture (VV_2) : $T_o = T_f = 7UdT$
- temps d'ouverture (VR_1) et (VE_2) : $T_o = 3UdT$
- temps de fermeture (VR_1) et (VE_2) : $T_f = 3UdT$

- débits nominaux des cuves C_x (en fonction du niveau L_i du liquide) = $3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

		Eléments	Unité
VM ₁	Perf	Temps (T_o, T_f)	UdT
		Coûts (C_{AM}, C_{AA}, C_{dM})	UdC
	Dysf	Blocage Ouverture	-
	Envir	Hauteur liquide	m
T _x	Perf	Débit (D_n)	m ³ /s
	Dysf	Fuite (D_f)	m ³ /s
	Envir	T° ext	°c
C _x	Perf	Niveau (L_i)	m
	Dysf	Fuite (D_f)	m ³ /s
	Envir	T° int	°c

Tableau 2 : Eléments du bilan de santé

5.1.3 Définition des critères de décision

Pour cette étude, des critères ont été définis afin de décider d'un classement. Chaque critère de décision cd_i est associé soit à la séquence d'actions seulement soit à la séquence d'actions et au bilan de santé des équipements :

- le temps de la réalisation d'une séquence : $cd_1(séq_i) = f(\mathcal{V}(eq_j), \mathcal{P}(séq_i))$.
- les coûts d'exploitation : $cd_2(séq_i) = f(\mathcal{V}(eq_j), \mathcal{P}(séq_i))$.
- le pourcentage des actions automatiques : $cd_3(séq_i) = f(\mathcal{P}(séq_i))$.
- la performance de réalisation de la mission : $cd_4(séq_i) = f(\mathcal{V}(eq_j), \mathcal{P}(séq_i))$.

5.2 Modélisation

5.2.1 Quantification des critères de décision

Pour chacun des quatre critères de décision établis, une fonction de quantification doit être définie, c'est à dire calculer les fonctions mathématiques combinant le critère en question avec les propriétés de la séquence et les propriétés des éléments de bilan de santé.

Pour le temps de réalisation d'une séquence donnée ($séq_i$), il est calculé en fonction des temps des actions (A_j) d'ouverture et de fermeture (T_o et T_f) des équipements (eq_j), ainsi que les temps de parcours (T_p) entre les équipements manuels (eq_j^M) en partant d'une position initiale I_0 . Ce qui donne :

$$cd_1(séq_i) = \sum_{A_j \in séq_i} T(A_j) + \sum_{j=0}^{|\text{séq}_i|^{\text{man}}} T_p(eq_j^M, eq_{j+1}^M) \quad (9)$$

avec : $|\text{séq}_i|^{\text{man}}$ le nombre d'actions manuelles d'une séquence donnée. Et $T(A_j) \in \{T_o(eq_j), T_f(eq_j)\}$ et $\{eq_0 = eq_{|\text{séq}_i|^{\text{man}}+1} = I_0\}$.

Le deuxième critère tient compte des coûts des actions manuelles et automatiques (C_{AM}, C_{AA}), ainsi que les coûts du matériel (C_{dM}) d'un équipement donné (eq_j) :

$$cd_2(séq_i) = \sum_{j=1}^{|\text{séq}_i|} (C_{A_j} + C_{dM}(eq_j)) \quad (10)$$

avec : $|\text{séq}_i|$ le nombre d'action de la séquence $séq_i$ et $C_{A_j} \in \{C_{AM}, C_{AA}\}$.

Le troisième critère définit le pourcentage des actions automatisées. Il est fonction de la cardinalité des actions automatisées :

$$cd_3(séq_i) = \frac{|\text{séq}_i|^{\text{auto}}}{|\text{séq}_i|} \quad (11)$$

avec : $|\text{séq}_i|^{\text{auto}}$ le nombre d'actions automatisées de la séquence.

Enfin, le critère 4 caractérise la performance de réalisation de la mission. Il est fonction des volumes des équipements participants à la mission objectif V_{MO} , des volumes des lignages V_{Lg} , des débits nominaux et des débits de fuites de l'ensemble des équipements de la séquence. Nous supposons que les niveaux initiaux nécessaires pour la réalisation de la mission sont vérifiés :

$$cd_4(séq_i) = \frac{V_{MO}(eq_j) + \sum_{j=0}^{|\text{séq}_i|} V_{Lg}(eq_j, eq_{j+1})}{D_n(eq_j) + \sum_{j=0}^{|\text{séq}_i|} D_f(eq_j)} \quad (12)$$

En remplaçant les valeurs numériques de ces paramètres, les différents critères sont calculés pour les $séq_1, séq_2$ et $séq_3$, ils sont résumés dans le tableau 3.

	cd_1	cd_2	cd_3	cd_4
$séq_1$	18.00	16.00	0.50	46.52
$séq_2$	40.00	28.00	0.33	45.97
$séq_3$	88.00	44.00	0.40	23.39

Tableau 3 : Quantification des critères de décision

5.2.2 Calcul des utilités

Suite à la quantification des critères, nous les normalisons en définissant des fonctions d'utilités. Des niveaux d'utilités supérieurs sont associés aux valeurs préférées. Les fonctions représentées dans la figure 5 sont proposées.

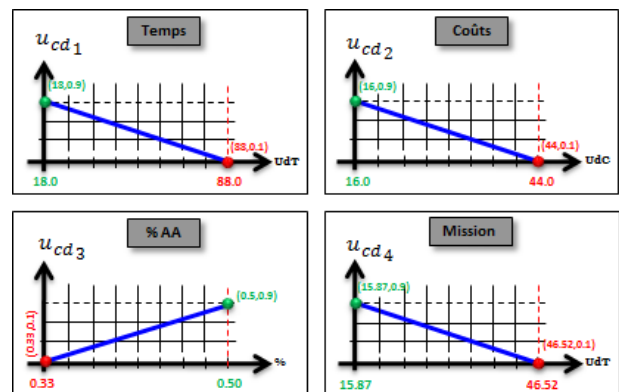


Figure 5 : Fonctions d'utilités

Les valeurs minimales et maximales des différentes fonctions sont calculées pour la mission, c'est-à-dire, en considérant toutes les séquences d'actions. Le tableau 4 récapitule les valeurs normalisées pour les trois séquences étudiées. Notons que l'intervalle [0.1 ; 0.9] est choisi afin de pouvoir calculer des critères de décision

avec des bilans de santé dégradés. Notons que la meilleure valeur d'un critère sur les séquences se voit affectées une utilité de 0.9 et la moins bonne une valeur de 0.1. L'utilisation de ces valeurs d'utilité permet de garder une « marge » lorsque pour une situation légèrement dégradée et acceptable, les valeurs de critère vont évoluer. Lorsque la situation se dégrade de trop et n'est plus acceptable, les valeurs des critères varient fortement et l'utilité devient nulle.

	u_{cd_1}	u_{cd_2}	u_{cd_3}	u_{cd_4}
$séq_1$	0.90	0.90	0.90	0.33
$séq_2$	0.65	0.56	0.10	0.35
$séq_3$	0.10	0.10	0.42	0.92

Tableau 4 : Valeurs normalisées

5.2.3 Agrégation

L'agrégation consiste à synthétiser les valeurs normalisées, provenant des différents critères, dans une valeur globale appelée score. Le choix d'un opérateur d'agrégation est fonction de l'application (Grabisch *et al.*, 2011). Pour notre application, nous avons décidé de comparer les résultats obtenus avec deux opérateurs de compromis : la moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet.

La moyenne pondérée associe un poids différent à chaque critère, la somme de ces pondérations étant égale à 1. Le calcul de la moyenne pondérée est donné par :

$$MP(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n W_i x_i \quad (13)$$

La méthode par intégrale de Choquet utilise des paramètres reflétant les poids des critères et le degré d'interaction entre ces critères. Les paramètres en question sont modélisés sous forme d'une capacité (ou mesures floues) (Marichal, 2000). L'intégrale de Choquet est calculée par (Murofushi et Sugeno, 1991) :

$$IC(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_{(i)} - x_{(i-1)}) \mu(A_{(i)}) \quad (14)$$

où $(.)$ en indice est l'opérateur de permutation tel que $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ avec $x_{(0)} = \emptyset$. $X : \{X_1, \dots, X_n\}$ est un ensemble d'indicateurs normalisés. μ est la capacité. $\mu(A)$ représente le degré d'importance de l'ensemble $A \subseteq X$ dans le calcul de la valeur globale de X .

Une analyse de l'intégrale de Choquet, à partir de la capacité, peut être réalisée en utilisant les indices d'importance de Shapley et les indices d'interaction. Le premier tient compte de l'importance d'un critère par rapport à ses contributions pour l'ensemble de la capacité. Quant au deuxième, il reflète l'interaction qui existe entre deux critères dans l'ensemble de la capacité.

Ce choix étant fait, se pose le problème de l'identification de leurs paramètres. Cherchant à intégrer des connaissances métiers dans notre approche, nous utilisons un ensemble d'exemples présentés et évalués par un expert pour cette identification. Ces exemples sont donnés dans le Tableau 5.

	u_{cd_1}	u_{cd_2}	u_{cd_3}	u_{cd_4}	score
cas_1	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
cas_2	0.90	0.90	0.90	0.30	0.60
cas_3	0.70	0.60	0.10	0.40	0.50
cas_4	0.70	0.90	0.90	0.20	0.45
cas_5	0.10	0.10	0.50	0.90	0.40
cas_6	0.50	0.90	0.90	0.10	0.30
cas_7	0.30	0.60	0.10	0.30	0.30
cas_8	0.10	0.10	0.50	0.60	0.30
cas_9	0.70	0.60	0.10	0.10	0.20
cas_{10}	0.10	0.10	0.50	0.30	0.20

Tableau 5 : Identification des paramètres des opérateurs d'agrégation

Les coefficients de la moyenne pondérée sont calculés, à partir des données d'apprentissage, en résolvant le système d'équations $A * W_i = B$, où A , est la matrice des alternatives et B , le vecteur des scores attribués à chaque alternative. Après normalisation, le tableau 6 donne les pondérations W_i .

	W_1	W_2	W_3	W_4
MP	0.388	0.068	0.075	0.469

Tableau 6 : Coefficients de la moyenne pondérée

En utilisant l'extension *Kappalab* du logiciel de traitement et d'analyse statistique *GNU R* (Grabisch *et al.*, 2007), nous pouvons identifier la capacité à partir des exemples fournis par l'expert. Le tableau 7 montre les valeurs de Shapley pour la capacité identifiée et le tableau 8 donne les indices d'interaction entre les différents critères.

	u_{cd_1}	u_{cd_2}	u_{cd_3}	u_{cd_4}
IC	0.300	0.131	0.087	0.482

Tableau 7 : Valeurs de Shapley

	u_{cd_1}	u_{cd_2}	u_{cd_3}	u_{cd_4}
u_{cd_1}		+0.015	+0.033	+0.024
u_{cd_2}	+0.015		-0.028	+0.194
u_{cd_3}	+0.033	-0.028		-0.021
u_{cd_4}	+0.024	+0.194	-0.021	

Tableau 8 : Indices d'interaction

5.2.4 Classement

Nous allons à présent interroger le modèle de classement. Les scores d'agrégation obtenus par les deux opérateurs de l'intégrale de Choquet (IC) et de la moyenne pondérée (MP) sont donnés dans le tableau 9.

	IC		MP	
	score	rang	score	rang
$séq_1$	0.612	1	0.732	1
$séq_2$	0.410	2	0.368	2
$séq_3$	0.394	3	0.348	3

Tableau 9 : Scores pour le classement des séquences

Nous voyons, sur la base des scores calculés par les deux méthodes, que les résultats sont identiques d'un point de vue classement.

5.3 Analyse des résultats

Dans cette partie, nous nous proposons de comparer les résultats des deux opérateurs d'agrégation en effectuant deux scénarii. Dans un premier temps, nous considérons une séquence avec un bilan de santé légèrement moins bon sur la voie 2. Malgré cette dégradation, l'expert propose a priori le même classement que dans le cas nominal du tableau 9. Dans un deuxième temps, nous considérons une dégradation plus importante sur la voie 2 où l'expert change ses préférences.

A partir de ces spécifications, l'objectif est d'analyser le classement des deux séquences 2 et 3. Nous nous attendons à ce que le calcul par les deux opérateurs (*IC* et *MP*) respecte le classement préétabli par les experts.

5.3.1 Variation légère des éléments $\mathcal{V}(eq_i)$

Pour ce test, nous avons simulé une légère variation au niveau des temps d'ouverture et de fermeture des équipements directs VM_i de la deuxième voie, ainsi qu'une légère variation des débits nominaux des équipements indirects T_x et C_x . Les nouveaux scores obtenus sont :

	IC		MP	
	score	rang	score	rang
$séq_2$	0.203	1	0.363	2
$séq_3$	0.196	2	0.368	1

Tableau 10 : Classement pour le scénario 1

En mode de fonctionnement normal (sans dégradations), le score de la $séq_2 > séq_3$. Le résultat donné dans le tableau 10, montre une inversion de score par la moyenne pondérée $séq_3 > séq_2$, alors que pour l'intégrale de Choquet le classement reste inchangé $séq_2 > séq_3$. En conclusion, le calcul par l'intégrale de Choquet est cohérent avec le classement préétabli par les experts.

5.3.2 Dégradation des éléments $\mathcal{V}(eq_i)$

Ce deuxième test a pour objectif d'illustrer la prise en compte d'une dégradation au sein du système. Il s'agit des temps d'ouverture et de fermeture des équipements VM_2 et VV_2 ainsi d'une fuite au niveau des équipements indirects T_x et C_x . Ce scénario consiste donc à simuler non seulement une baisse de performances des vannes manuelles mais également le dysfonctionnement des équipements indirects. Si le modèle de classement fonctionne conformément à ce qui est attendu, il devrait cette fois inverser le classement entre les $séq_2$ et $séq_3$. Les scores sont calculés et présentés dans le tableau 11.

	IC		MP	
	score	rang	score	rang
$séq_2$	0.190	2	0.374	1
$séq_3$	0.196	1	0.368	2

Tableau 11 : Classement pour le scénario 2

Les scores calculés par l'intégrale de Choquet permettent d'obtenir le résultat attendu, contrairement aux scores obtenus par la moyenne pondérée qui donne un meilleur score à la $séq_2$. L'inversion de scores par l'intégrale de Choquet $séq_3 > séq_2$ répond aux attentes des experts.

6 CONCLUSION

Dans cet article, la problématique de classement des séquences de conduite d'un système complexe est traitée. Dans un premier temps, la synthèse bibliographique a montré l'intérêt de travailler sur des techniques issues de la théorie de l'utilité multi-attribut conjointement avec la notion des bilans de santé des équipements. Pour illustrer ce problème, une étude de cas est présentée sur la plate-forme expérimentale *CISPI*.

Il ressort de cette étude que les résultats d'agrégation obtenus par l'intégrale de Choquet, permettent de classer les séquences d'actions en respectant les choix des experts et ce pour différents scénarios de fonctionnement correspondants à des valeurs différentes des bilans de santé des équipements.

L'approche proposée présente de nombreux avantages, elle permet de formaliser la connaissance métier et de mettre à la disposition des experts des informations objectives et consensuelles. De surcroît, cette approche permet de prendre en compte l'hétérogénéité, le nombre, l'importance, l'état réel et la sollicitation des équipements lors de la prise de décision.

Les travaux futurs seront axés dans un premier temps sur une étude comparative entre les résultats des deux méthodes présentées dans ce papier et la méthode de la moyenne pondérée ordonnée (*OWA*) avec davantage de séquences à classer et de critères à analyser. Au-delà de cette comparaison, nous envisageons d'intégrer l'aspect hiérarchique des bilans de santé d'un système complexe. En effet, pour les systèmes complexes, la notion de santé doit être présente aux différents niveaux d'abstraction du système et doit refléter les relations existantes entre ces niveaux « fonctionnel-support ».

REFERENCES

- Abichou B., 2013. *Contribution à la formalisation de bilans/états de santé multi-niveaux d'un système pour aider à la prise de décision en maintenance*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, CRAN, Nancy, France.
- Arrow K.-J., 1951. *Social Choice and Individual Values*. Cowles Foundations and Wiley, New-York.
- Beliakov G., Pradera A., Calvo T., 2007. *Aggregation functions: A guide for practitioners*. Springer Berlin Heidelberg.
- Bouaziz M.-F., Zamaï E., Duvivier F., 2013. Towards Bayesian Network Methodology for Predicting the equipment Health Factor of Complex Semiconductor Systems. *International Journal of Production Research*, Volume 51, Issue 15, 4597-4617.
- Byington C.-S., Watson M., Edwards D., 2004. Dynamic Signal Analysis and Neural Network Modeling for Life Prediction of Flight Control Actuators. *Proceedings of*

- the American Helicopter Society 60th Annual Forum. Alexandria, VA: AHS.
- Clanché F., Gouyon D., Dobre D., Pétin J.-F., Morel G., 2010. Plate-forme pour la conduite interactive et sûre. 3^{èmes} Journées Démonstrateurs en Automatique, Angers, France.
- Frey G., Litz L., 2000. Formal methods in PLC programming. *Proceedings of the IEEE SMC 2000*, pages 2431-2436 (4). Nashville, TN.
- Grabisch M., and Perny P., 2007. *Agrégation multicritère*. In B. Bouchon and C. Marsala, editors, Utilisations de la logique floue, Hermès.
- Grabisch M., 2006. *Evaluation subjective*, Concepts et Méthodes pour l'Aide à la Décision. D. Bouyssou and D. Dubois and M. Pirlot and H. Prade (Ed.) pp. 175-232.
- Grabisch M., Kojadinovic I., Meyer P., 2007. A review of methods for capacity identification in Choquet integral based multi-attribute utility theory Applications of the Kappalab R package. in *European Journal of Operational Research*, vol 186, pp. 766-785
- Grabisch M., Marichal J.-L., Mesiar R., Pap E., 2011. Aggregation functions: Means. *Information Sciences*, vol. (181), pp: 1-22.
- Kalgren P., Byington C., Roemer M., Watson M., 2006. Defining PHM, A Lexical Evolution of Maintenance and Logistics. *IEEE Autotestcon 2006 Conference Record*, Anaheim, California, pp. 353–358.
- Kowalewski S., Preuig J., 1996. Verification of sequential controllers with timing functions for chemical processes. *IFAC 13th World Congress*, volume J, pages 419-424, San Francisco, USA.
- Kumar S., Pecht M., 2010. Modeling approaches for prognostics and health management of electronics. *Int. Jour. of Performability Engineering*, vol. 6, no. 5, p. 467.
- Liu X., 2007. *Machinery fault diagnostics based on fuzzy measure and fuzzy integral data fusion techniques*. PhD thesis, Queensland University of Technology.
- Machado J., Denis B., Lesage J.-J., Faure J.-M., Ferreira Da Silva J.C.-L., 2006. Logic controllers dependability verification using a plant model. *DESDes06*, pages 37-42, Rydzyna, Poland.
- Marichal J.-L., 2000. On Choquet and Sugeno integrals as aggregation functions. In *Fuzzy measures and integrals*, vol. (40), pp: 247-272.
- Murofushi T., Sugeno M., 1991. A theory of fuzzy measures. Representation, the Choquet integral and null sets. In *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. (159), pp: 532-549.
- Niel E., Pietrac L., Regimbal L., 2001. Advantages and drawbacks of the logic program synthesis using supervisory control theory. *10th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2001)*, Vienna, Austria.
- Perny P., 1992. *Sur le non respect de l'axiome d'indépendance dans les méthodes de type ELECTRE*. Cahiers du CERO, 34 :211–232.
- Racoceanu D., 2006. *Contribution à la surveillance des systèmes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle*. Synthèse des activités de recherche et d'encadrement, Université de Franche-Comté de Besançon, France.
- Ramadge G., and Wonham W.-M., 1989. The control of discrete event systems. *Proc. IEEE, Special issue on DEDSs*, 77, pp.81-98.
- Ribot P., 2009. *Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, LAAS, France.
- Roussel J.-M., Faure J.-M., 2002. An algebraic approach for PLC programs verification. In *Proceedings of 6th international workshop on discrete event systems (WODES'02)*, Zaragoza, Spain, pp303–308, 2–4.
- Rushby J., 2000. *Theorem proving for verification*. In Franck Cassez, editor, Modelling and Verification of Parallel Processes : MoVEP 2k, Nantes, France.
- Schnoebelen P., Bérard B., Bidoit M., Laroussinie F., Petit A., 1999. *Vérification de logiciels : Techniques et outils du model-checking*. Vuibert, Paris, ISBN 2-7117-8646-3.
- Sen A.-K., 1986. *Social Choice Theory*. In : K.J. Arrow, M.D. Intrilligator (Eds), Handbook of Mathematical Economics, chapter 22, pages 1073–1181. Elsevier Sciences Publishers, North-Holland.
- Shin J., 2009. *Decision support methods for closed-loop conceptual design*. Thèse de doctorant, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suisse.
- Volker N., and Kramer B.-J., 2002. Automated verification of function block-based industrial control systems. *Science of Computer Programming*, 42(1):101-113.
- Wonham W.-M., and Ramadge P.-J., 1987. On the supremal controllable sublanguage of a given language, *SIAM J. Control Optimization*, 25, pp 637-659.
- Zio E., 2009. Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, pp. 125-141.